面向电-热综合能源系统的双线性抗差状态估计方法

陈艳波^{1,2},姚 远¹,杨晓楠²,郎燕生²
(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206;
2. 中国电力科学研究院有限公司 电网安全与节能国家重点实验室,北京 100192)

摘要:提出一种面向电-热综合能源系统(IEHS)的双线性抗差状态估计方法。首先,通过引入辅助变量构建 IEHS的线性加权最小绝对值(WLAV)模型,然后通过一次非线性变换与求解一个二次规划模型得到状态变 量的估计值。所提方法的优势为:对强相关的多不良数据具有较好的辨识能力;不需要进行非线性迭代,因 而具有较高的计算效率。在搭建的IEHS测试系统上验证了所提方法的有效性。

关键词:热电联供;量测方程线性化;状态估计;强相关性不良数据;综合能源系统

中图分类号:TM 73 文献标志码:A DOI:10.16081 / j.epae.201908031

0 引言

在传统能源系统(电力系统、天然气系统、热力 系统等)中,各类能源系统单独规划、单独设计、独立 运行,从而导致能源的整体使用效率不高^[1-3]。因 此,综合能源系统 IES(Integrated Energy System)被 认为是未来人类社会能源的主要承载形式^[4-5]。其 中,热电联供 CHP(Combined Heat and Power)系统 作为 IES 中的重要能源转换组件,已成为 IES 的主要 研究方向之一^[6-7]。热电联产是指利用化石燃料、余 能、可再生能源、电能、CHP 等多种方式同时产生电 能和可用的热量,具有很大的灵活性^[8-9]。为实现对 电 - 热综合能源系统 IEHS (Integrated Electricity-Heat System)运行状态的全面、实时和精确感知,研 究面向 IEHS 的高效状态估计 SE(State Estimation) 方法成为当务之急。

对于 IEHS, 文献[10]基于传热学原理提出了热 网能量传输模型, 以冷热电联供系统为基础建立了 含有热网的多区域 IEHS 模型; 文献[11]研究了 IEHS 内各类耦合元件的特性, 并提出了基于解耦 热-电模型和耦合热-电模型2种方式下的 IEHS 潮 流计算方法; 文献[12]针对电-热负荷波动的不确定 性, 提出一种基于 IEHS 的区间潮流计算, 以评估不 确定因素对 IEHS 运行状态的影响。

目前,面向电力系统状态估计的研究已较为成 熟,而对于热网状态估计的研究相对较少。文献 [13]提出了一种基于用户端量测数据的热网状态估 计方法,该方法首先利用已知用户量测数据和网络 拓扑计算出整个系统的管道流量,再利用管道流量 建立关于温度和热损耗的线性方程,通过最小二乘

收稿日期:2019-04-15;修回日期:2019-06-26

基金项目:国家电网公司科技项目(52110418002R)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(52110418002R)

估计求得整个系统的状态变量估计值。该方法虽然 计算简单,但不存在量测冗余度,因此估计精度不 高。文献[14]提出了一种面向电-热耦合系统的加 权最小二乘WLS(Weighted Least Square)状态估计 方法,具有较高的收敛性,在没有不良数据时可获得 较高的估计精度,具有重要的理论意义和应用价值。 但WLS本身没有抗差性,为此在实际应用时常在 WLS后加上一个基于残差的不良数据辨识环节,如 常用的最大标准化残差LNR(Largest Normal Residual),但WLS+LNR法对于强相关的多不良数据的 辨识能力不强,且模型需进行非线性迭代,计算效率 也有待提高。

本文提出一种面向 IEHS 的双线性抗差状态估 计 BRSE(Bilinear Robust State Estimation)法,该方 法是将笔者前期的工作(文献[15])从电力系统扩展 到 IEHS,通过引入辅助变量将 IEHS 中的量测方程 线性化,然后构建面向 IEHS 的线性加权最小绝对值 WLAV(Weighted Least Absolute Value)状态估计方 法;进而通过一次非线性变换和线性 WLS求得 IEHS 原始状态变量的估计值。最后通过仿真算例测试所 提方法的有效性。

1 热网潮流及量测模型概述

热网通常由供热系统与回热系统组成。其中, 热量以水或蒸汽的形式,通过供热管道与回热管道 在热源与用户中进行传递。对热网进行分析时,通 常将其分别建模为水力模型与热力模型。水力模型 中的变量一般包括压强与流量,热力模型中的变量 包括节点供热温度、回热温度与热功率。

1.1 水力模型

水力模型主要包括流量连续方程、水压损失方 程、回路压降方程这3个方程。

(1)流量连续方程。该方程描述了对于水力模型中的某个节点,流进该节点的水流量等于流出该

节点的水流量与该节点消耗 / 注入的水流量之和, 表示为:

$$\sum \dot{m}_{\rm in} = \sum \dot{m}_{\rm out} + \dot{m}_{\rm qi} \tag{1}$$

其中, $\sum \dot{m}_{in}$ 为流入某节点的总水流量; $\sum \dot{m}_{out}$ 为流出 该节点的总水流量; \dot{m}_{qi} 为该节点消耗至负荷的水流 量或由水源注入至该节点的水流量。

(2)水压损失方程。该方程描述了流过每条管 道内的水流量与该管道产生的水压损失的关系,表 示为:

$$\boldsymbol{p}_{\rm b} = \boldsymbol{K} \boldsymbol{\dot{\boldsymbol{m}}} \, | \, \boldsymbol{\dot{\boldsymbol{m}}} \, | \tag{2}$$

其中, *m*为管道内的水流量(单位为kg/s); *p*_b为管 道的水压损失向量; *K*为管道的阻抗系数向量, 主要 取决于管道的直径, 其具体计算方法参考文献[11]。

(3)回路压降方程。回路压降方程描述的是对 于水力模型中的一个闭环回路,各管道水压损失*p*_{bl} 的代数和为0,即:

$$\sum p_{\rm bl} = 0 \tag{3}$$

1.2 热力模型

由于热网系统中同时存在供热系统与回热系统,因此与热网系统中的节点相关的温度包括节点供热温度 T_{si}与节点回热温度 T_{ti}。此外,对于负荷节点,将节点出口处(即供热给热负荷后)的水流量温度(未混入回热系统之前)定义为节点出口温度 T_{si}。热力模型中与节点相关的温度关系见附录 A 中的图 A1。

热力模型中节点的热功率表示为:

$$\phi_{i} = \begin{cases} C_{p} \dot{m}_{qi} \left(T_{si} - T_{oi} \right) & 负荷节点 \\ C_{p} \dot{m}_{qi} \left(T_{si} - T_{ii} \right) & 源节点 \end{cases}$$
(4)

其中,φ,为节点注入热功率,由热源注入取正,被负 荷消耗取负;C。为水的比热容。

关于热网中温度之间的关系,主要由方程式(5) 和式(6)描述,具体可参考文献[11]。各变量在热网 中的关系见附录A中的图A2和图A3。

$$T_{\rm end} = (T_{\rm start} - T_{\rm a}) \,\mathrm{e}^{-\frac{\Lambda L}{C_{\rm p} \dot{m}_{\rm se}}} + T_{\rm a} \tag{5}$$

$$\left(\sum \dot{m}_{\rm out}\right)T_{\rm out} = \sum \dot{m}_{\rm in}T_{\rm in} \tag{6}$$

其中, T_{start} 与 T_{end} 分别为某条管道相连的首端与末端 节点的温度(单位为 \mathbb{C}); \dot{m}_{se} 为该管道内的水流量 (单位为kg/s); T_a 为环境温度(单位为 \mathbb{C}); λ 为每条 管道单位长度下的热传递因数(单位为 $\mathbb{W}/(m \cdot K)$);L为管道的长度(单位为m); T_{out} 为节点的混合温度 (单位为 \mathbb{C}); T_{in} 为注入管道对应的末端温度。

1.3 热网量测模型

由上述分析可知,热网中涉及到的物理量包括 节点压强*p_i、*支路流量*m_i、*节点注入流量*m_{ai}、*节点供 热温度 T_{si} 、节点回热温度 T_{ii} 与节点热功率 ϕ_i 等。

选取节点压强 p_i 、节点供热温度 T_s 和节点回热温度 T_s 和节点回热温度 T_s 为状态变量,则热量状态向量 x_b 可表示为:

$$\boldsymbol{x}_{\rm h} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{p} \ \boldsymbol{T}_{\rm s} \ \boldsymbol{T}_{\rm r} \end{bmatrix}^{\rm T}$$
(7)

热网状态估计所用的量测量一般包括节点压强 $p_i、$ 支路流量 m_{ij} 、节点注入流量 \dot{m}_{qi} 及节点供热温度 T_{si} 、节点回热温度 T_{ii} 、节点热功率 ϕ_i 等,对应的量测 量及量测方程表示为(为表述简单起见,这里忽略量 测噪声):

$$z_{h} = \begin{bmatrix} p \; ; \dot{m} \; ; \dot{m}_{q} \; ; \; T_{s} \; ; \; T_{r} \; ; \; \phi \end{bmatrix}$$
(8)
$$\begin{cases} p_{i} = p_{i} \\ \dot{m}_{ij} = \frac{1}{\sqrt{K_{ij}}} \sqrt{p_{i} - p_{j}} \\ \dot{m}_{qi} = \sum_{j \in i} \frac{1}{\sqrt{K_{ij}}} \sqrt{p_{i} - p_{j}} \\ T_{si} = T_{si} \\ T_{ri} = T_{ri} \\ \phi_{i} = C_{p} \dot{m}_{qi} \; (T_{si} - T_{ri}) \end{cases}$$
(9)

其中, K_{ij} 为管道ij的阻抗系数; $j \in i$ 表示所有与节点i相连的节点 j_o

2 电-热耦合系统基本模型

2.1 耦合元件CHP模型

CHP单元一般包括3种类型:燃气轮机、内燃式 往复发动机和蒸汽轮机。对于燃气轮机与内燃式往 复发动机,其产生的电能与热能的关系为:

$$c_{\rm m} = \phi_{\rm CHP} / P_{\rm CHP} \tag{10}$$

其中, *c*_m为输出热功率与电功率的比值; φ_{CHP}为CHP 单元的可用热功率输出, *P*_{CHP}为CHP单元的电功率 输出, 两者的输出量由燃气机中燃气的输入比决定。

对于蒸汽轮机,在给定的燃气消耗下,随着蒸汽 抽取的比例增加,产电功率的效率会降低,其关系如 式(11)所示。

$$Z = \frac{\Delta \phi}{\Delta P} = \frac{\phi_{\rm CHP} - 0}{P_{\rm con} - P_{\rm CHP}}$$
(11)

其中, Δφ为增加的热功率输出; ΔP为减少的电功率 输出; P_{con}为蒸汽抽取为0时的电功率输出。

2.2 电-热耦合系统量测方程

对于一个通过CHP系统进行耦合的IEHS,其量 测方程可表示为:

$$\boldsymbol{z}_{\mathrm{e}} = \boldsymbol{h}_{\mathrm{e}}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}) + \boldsymbol{r}_{\mathrm{e}}$$
(12)

$$\boldsymbol{z}_{\mathrm{h}} = \boldsymbol{h}_{\mathrm{h}}(\boldsymbol{x}_{\mathrm{h}}) + \boldsymbol{r}_{\mathrm{h}} \tag{13}$$

$$g(\mathbf{x}_{e}, \mathbf{x}_{b}) = 0 \tag{14}$$

其中, x_e 为电网的状态变量, $x_e = [U; \theta], U_{\forall} \theta$ 分别为电 网中的节点电压幅值与相角; z_e 为电网的量测量,

 $h_{e}(x_{e}), h_{h}(x_{h})$ 分别为电网、热网的量测方程, z_{h} 和 $h_{h}(x_{h})$ 分别如式(8)和式(9)所示, $z_{e}, h_{e}(x_{e})$ 的具体表 示参考文献[15]; r_{e}, r_{h} 分别为电网和热网的量测误 差; $g(x_{e}, x_{h})$ 为电网与热网的耦合约束方程,具体表 达式如式(10)和式(11)所示。

2.3 已有的热-电耦合系统状态估计模型

文献[14]将电力系统状态估计的经典方法WLS 扩展到IEHS中,提出了面向热-电耦合系统的WLS 模型:

$$\min J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^{\mathrm{T}} \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]$$

s.t. $b(\mathbf{x}) = 0$ (15)

其中,b(x) = 0为电-热耦合系统节点零注入等式约 束及耦合约束; $z = [z_h; z_e]; R = \text{diag}[R_h; R_e]; h(x) = [h_h(x_h); h_e(x_e)]_o$

以上模型具有较高的收敛性,在没有不良数据时估计精度较高,因而具有重要的理论意义和应用价值。但这种方法尚存在如下不足:WLS本身没有抗差性,为此在实际应用时常在WLS之后加上一个基于残差的不良数据辨识环节,比如LNR法,但WLS+LNR法无法有效辨识强相关的多不良数据,辨识效率也不高;需要进行非线性迭代,模型的整体计算效率不高。

3 面向电-热耦合系统的双线性抗差状态 估计

下面将笔者前期提出的面向电力系统的双线性 抗差状态估计方法^[15]扩展到IEHS中,以解决模型 式(15)存在的不足。

3.1 热网量测冗余度分析

假设热网中节点个数为 N_h ,支路数为 b_h ,量测冗余度为 M_h 。若状态变量与量测量按式(8)和式(9)选取,则此时的热网冗余度为:

$$M_{\rm h} = (5N_{\rm h} + b_{\rm h}) / (3N_{\rm h}) \tag{16}$$

为构建线性化量测方程,选取支路压降(即两节 点间压强差值)开根号为量测变量,同时忽略节点热 功率量测,可构造如式(17)和式(18)所示的量测量:

$$z_{h}^{'} = [p_{h}; \dot{m}; \dot{m}_{q}; T_{s}; T_{r}] \qquad (17)$$

$$\begin{cases}
\sqrt{p_{i} - p_{j}} = \sqrt{p_{i} - p_{j}} \\
\dot{m}_{ij} = \frac{1}{\sqrt{K_{ij}}} \sqrt{p_{i} - p_{j}} \\
\dot{m}_{qi} = \sum_{j \in i} \frac{1}{\sqrt{K_{ij}}} \sqrt{p_{i} - p_{j}} \\
T_{si} = T_{si} \\
T_{ri} = T_{si}
\end{cases} \qquad (18)$$

当热网为全量测时,此时状态变量若选取为支路压强降落 *p*_b开根号、节点供热温度 *T*_s与节点回热

温度T₁,则此时量测冗余度变为:

$$M'_{\rm h} = (3N_{\rm h} + 2b_{\rm h}) / (2N_{\rm h} + b_{\rm h})$$
(19)

热网一般为辐射状,即b_h=N_h-1。可以看出, 通过省略节点热功率对应的量测方程以及选取支路 压降替代节点压强作为新的量测量,得到的量测方 程易通过引入辅助变量将其线性化,进而便于求解, 但与此同时也会牺牲一定的量测冗余度。

3.2 精确线性WLAV的建模与求解

(1)第一阶段:线性WLAV。

引入辅助变量 $y = [\alpha_{ij}; T_{si}; T_{i}; U_i; R_{ij}; X_{ij}], y$ 具体表示为:

$$\boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\alpha}_{ij} \\ \boldsymbol{T}_{si} \\ \boldsymbol{T}_{ii} \\ \boldsymbol{U}_{i} \\ \boldsymbol{R}_{ij} \\ \boldsymbol{X}_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{p_{i} - p_{j}} \\ \boldsymbol{T}_{si} \\ \boldsymbol{T}_{si} \\ \boldsymbol{u}_{i}^{2} \\ \boldsymbol{u}_{i} \boldsymbol{u}_{j} \cos \theta_{ij} \\ \boldsymbol{u}_{i} \boldsymbol{U}_{si} \cos \theta_{ij} \end{bmatrix}$$
(20)

其中, u_i , u_j 分别为节点i,j的电压幅值; θ_{ij} 为节点i,j的相角差。

则IEHS量测方程可表示为:

$$\tilde{z} = Cy + \tilde{e} \tag{21}$$

其中, ž为量测矢量; ě为噪声矢量; C为常系数矩阵。

基于式(21)的线性量测方程,可建立基于线性 WLAV的IEHS状态估计模型,表示为:

$$\min_{\substack{i=1\\\text{s.t.}}} J(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{N_m} w_i \left| \tilde{z}_i - C_i \mathbf{y} \right|$$

$$\text{s.t. } E\mathbf{y} = \mathbf{0}_d$$

$$(22)$$

其中, N_m 为量测量的个数; w_i 为第i个量测量对应的 权重系数; \tilde{z}_i 为第i个量测量; C_i 为第i个量测量对应 的系数向量; $Ey = 0_d$ 为零注入约束和耦合约束,E为 对应的系数矩阵, $0_d \in \mathbb{R}^{d \times 1}$ 。

式(22)对应的模型可等价为式(23)所示的线性 规划模型:

$$\begin{cases} \min J(s, t, y^{(s)}, y^{(t)}) = \sum_{i=1}^{N_{m}} w_{i}(s_{i} + t_{i}) \\ \begin{cases} z_{i} - \sum_{j=1}^{n} c_{ij} (y_{j}^{(s)} - y_{j}^{(t)}) + s_{i} - t_{i} = 0 & 1 \le i \le N_{m} \\ \end{cases}$$
s.t.
$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n} E_{ij} (y_{j}^{(s)} - y_{j}^{(t)}) = 0 & 1 \le i \le N_{m} \\ y_{j}^{(s)} \ge 0, y_{j}^{(t)} \ge 0 & 1 \le j \le n \\ s_{i} \ge 0, t_{i} \ge 0 & 1 \le i \le N_{m} \end{cases}$$
(23)

其中,n为状态变量个数; $y_j^{(s)}$ 、 $y_j^{(t)}$ 分别为 $y^{(s)}$ 、 $y^{(t)}$ 的第j维元素; s_i 、 t_i 分别为s、t的第i维元素; c_i 为C的第i行 第j列元素; E_i 为E的第l行第j列元素。

模型式(23)可转换为标准的线性规划形式:

$$\begin{cases} \min J(Y) = d^{\mathsf{T}}Y \\ \mathbf{s.t.} \quad \begin{cases} FY = B \\ Y \ge 0 \end{cases}$$

$$d^{\mathsf{T}} = [\mathbf{0}_{n}^{\mathsf{T}}, \mathbf{0}_{n}^{\mathsf{T}}, \boldsymbol{w}_{N_{\mathsf{m}}}^{\mathsf{T}}, \boldsymbol{w}_{N_{\mathsf{m}}}^{\mathsf{T}}], \quad \mathbf{0}_{n}^{\mathsf{T}} = [0, 0, \cdots, 0] \in \mathbf{R}^{1 \times n} \end{cases}$$
(24)

$$\boldsymbol{w}_{N_{m}}^{\mathrm{T}} = [\boldsymbol{w}_{1}, \boldsymbol{w}_{2}, \dots, \boldsymbol{w}_{N_{m}}] \in \mathbf{R}^{1 \times N_{m}}, \quad \boldsymbol{B} = [\tilde{\boldsymbol{z}}; \mathbf{0}_{b}]$$
$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & -\boldsymbol{C} & \boldsymbol{I}_{N_{m}} & -\boldsymbol{I}_{N_{m}} \\ \boldsymbol{E} & -\boldsymbol{E} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{Y}^{\mathrm{T}} = [(\boldsymbol{y}^{(s)})^{\mathrm{T}}, (\boldsymbol{y}^{(t)})^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}, \boldsymbol{t}^{\mathrm{T}}]$$

其中,**0**_b = $[0,0,\dots,0]^{T} \in \mathbf{R}^{b \times 1}$; I_{N} 为 N_{m} 阶单位矩阵。

模型式(24)为线性规划问题,可采用 CPLEX 求 解,从而得到辅助变量 y的估计值 $\hat{y} = \hat{y}^{(s)} - \hat{y}^{(t)}$,其中 $\hat{y}^{(s)}, \hat{y}^{(t)}$ 分别为 $y^{(s)}, y^{(t)}$ 的估计值。

(2)第二阶段:非线性变换。

由式(20)可以看出,通过第一阶段的线性 WLAV,热网中的状态变量节点供热温度 T_s与节点 回热温度 T_r的估计值已被求出,因此需要对 y 中的 其余变量进行非线性变换,表示为:

$$\begin{cases} f_1(\alpha_{ij}) = \alpha_{ij}^2 = p_i - p_j \\ f_2(U_i) = \sqrt{U_i} = u_i \\ f_3(R_{ij}) = \arccos\left[R_{ij}/(u_i u_j)\right] = \theta_{ij} \\ f_4(X_{ij}) = \arcsin\left[X_{ij}/(u_i u_j)\right] = \theta_{ij} \end{cases}$$
(25)

由此可知,通过式(25),可以求出热网中支路首 末两端的压强差值的估计值,电网中各节点电压的 幅值的估计值以及支路首末两端的相角差的估 计值。

(3)第三阶段:线性WLS。

对于电网与热网,从理论上看,所有支路两端相 角差 / 支路两端压强差的估计值与所有节点相角 / 节点压强的估计值存在如下关系:

$$\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{e}} \boldsymbol{\theta} \tag{26}$$

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{h}} \boldsymbol{p} \tag{27}$$

其中,θ_b为电网的支路相角差;A_e、A_b分别为电网与 热网的支路-节点关联矩阵,其中的元素的定义分别 如式(28)和式(29)所示。

由于 θ_{b} 、 p_{b} 是由精确线性WLAV的第一阶段与 第二阶段所得,因此存在误差,式(26)和式(27)不严 格成立,可将 θ_{b} 、 p_{b} 看作包含噪声的伪量测,则有:

$$\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{e}} \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{r}_{\mathrm{e}} \tag{30}$$

$$\boldsymbol{p}_{\mathrm{b}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{h}} \boldsymbol{p} + \boldsymbol{r}_{\mathrm{h}} \tag{31}$$

其中, r_{e} 、 r_{h} 分别为 θ_{h} 与 p_{b} 对应的噪声矢量。

基于式(30)、(31)可构建线性WLS模型如下:

$$\begin{cases} \min J(\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{b}}) = (\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{b}} - \boldsymbol{A}_{\mathrm{e}} \boldsymbol{\theta})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{W}_{\mathrm{e}} (\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{b}} - \boldsymbol{A}_{\mathrm{e}} \boldsymbol{\theta}) \\ \min J(\boldsymbol{p}_{\mathrm{b}}) = (\boldsymbol{p}_{\mathrm{b}} - \boldsymbol{A}_{\mathrm{h}} \boldsymbol{p})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{W}_{\mathrm{h}} (\boldsymbol{p}_{\mathrm{b}} - \boldsymbol{A}_{\mathrm{h}} \boldsymbol{p}) \end{cases}$$
(32)

其中, W_{e} 、 W_{h} 为对角权重矩阵,其值分别取决于噪声 r_{e} 和 r_{h} 的方差。

式(32)可采用 CPLEX 求解。则可得电网中所 有节点的相角估计值与热网中所有节点的压强估 计值。

4 算例分析

本文搭建了一个 IEHS 测试系统。20 节点热网 耦合系统的参数主要参考文献[11], IEEE 39 节点系 统中的节点 12 与 20 节点热网中的热源节点通过 CHP进行耦合。系统拓扑结构图及具体参数如附录 B所示。

4.1 正常运行时测试

4.1.1 估计结果对比

首先,分别采用传统 WLS 法与本文所提 BRSE 法对 IEHS 测试系统进行单次状态估计。部分节点 的状态变量真值以及状态估计结果如表 1—3 所示, 表中 u_i, p_i为标幺值。完整结果见附录C。

由表1—3可以看出,由传统WLS法与BRSE法 得到的IEHS状态变量的估计结果相差不大。

4.1.2 估计精度测试

采用如式(33)和式(34)所示的指标来衡量状态

表 1 由传统 WLS 法与 BRSE 法得到的 估计结果(电网)

Table 1 Estimation results of electric network, obtained by traditional WLS method and BRSE method

| 共占 : | 状态变 | き重真値 | 传统WLS | 法估计结果 | BRSE 法 | 估计结果 |
|-------------|--------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|
| 1 닜, 다 | u_i | θ_i / rad | <i>u</i> _i | θ_i / rad | <i>u</i> _i | θ_i / rad |
| 1 | 1.0475 | -0.1658 | 1.0476 | -0.1658 | 1.0478 | -0.1662 |
| 2 | 1.0490 | -0.1211 | 1.0490 | -0.1211 | 1.0492 | -0.1216 |
| 3 | 1.0304 | -0.1707 | 1.0305 | -0.1708 | 1.0306 | -0.1712 |
| 4 | 1.0038 | -0.1846 | 1.0039 | -0.1846 | 1.0040 | -0.1848 |
| 5 | 1.0050 | -0.1640 | 1.0051 | -0.1640 | 1.0052 | -0.1641 |
| 6 | 1.0073 | -0.1518 | 1.0074 | -0.1518 | 1.0076 | -0.1519 |

表2 由传统 WLS法与 BRSE法得到的估计结果(热网) Table 2 Estimation results of heat network, obtained by traditional WLS method and BRSE method

| 共占: | 传统 | WLS法估计 | 结果 | BRSE法估计结果 | | |
|-----|---------|-------------------|---------------|-----------|-------------------|-------------|
| 미묘대 | p_i | $T_{\rm si}$ / °C | T_{ri} / °C | p_i | $T_{\rm si}$ / °C | T_{n} / C |
| 1 | -0.0322 | 99.86820 | 49.4911 | -0.0321 | 99.8668 | 49.4907 |
| 2 | -0.0589 | 99.76858 | 49.4964 | -0.0589 | 99.7687 | 49.4970 |
| 3 | -0.1855 | 99.68930 | 49.5017 | -0.1854 | 99.6880 | 49.5013 |
| 4 | -0.2827 | 99.61640 | 49.5026 | -0.2826 | 99.6169 | 49.5033 |
| 5 | -0.3703 | 99.53660 | 49.5046 | -0.3702 | 99.5366 | 49.5044 |
| 6 | -0.4494 | 99.44810 | 49.5082 | -0.4493 | 99.4483 | 49.5076 |

表3 热网状态变量真值

Table 3 True value of state variable of heat network

| 节点 i | P_i | $T_{\rm si}$ / °C | $T_{ri} \nearrow ^{\circ} \mathbb{C}$ |
|------|---------|-------------------|---------------------------------------|
| 1 | -0.0321 | 99.8679 | 49.4911 |
| 2 | -0.0589 | 99.7682 | 49.4965 |
| 3 | -0.1854 | 99.6889 | 49.5017 |
| 4 | -0.2827 | 99.6160 | 49.5026 |
| 5 | -0.3702 | 99.5363 | 49.5046 |
| 6 | -0.4493 | 99.4477 | 49.5082 |

估计的精度。

$$S_{1} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{T} \sum_{i=1}^{n} \left| x_{i}^{*} - x_{i} \right|$$
(33)

$$S_2 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^{T} \max \left\| \boldsymbol{x}^* - \boldsymbol{x} \right\|$$
(34)

其中, S_1 、 S_2 分别衡量了状态变量的整体偏差和最大 偏差; x_i^* 、 x_i 分别为第i个状态变量的真值和估计值; x^* 、x分别为状态变量的真值向量和估计值向量;T为 进行蒙特卡洛实验的总次数。

将本文提出的BRSE法与文献[14]中的WLS法 进行对比。在潮流真值上叠加高斯噪声(标准差取 为0.001)形成量测数据,并进行1000次蒙特卡洛实 验。实验结果如表4、表5所示。表中,u_i,p_i的相关 数据均为标幺值。由表可见,当IEHS正常运行时, 本文提出的BRSE法与文献[14]中的WLS法的估计 精度相当。

表4 传统 WLS 法与 BRSE 法得到的状态变量整体偏差 Table 4 Overall deviation obtained by traditional WIS method and BRSE method

| 团伙 | 坐太亦县 | 状态变量 | 整体偏差 |
|-----|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| M H | 扒心又里 | 传统 WLS法 | BRSE 法 |
| | p_i | 1.69×10^{-4} | 5.24×10^{-3} |
| 热网 | $T_{si} \nearrow ^{\circ} \mathbb{C}$ | 1.35×10^{-2} | 1.42×10^{-2} |
| | $T_{ii} \nearrow ^{\circ} \mathbb{C}$ | 5.93×10^{-3} | 6.28×10^{-3} |
| 由교 | u_i | 8.83×10^{-4} | 6.38×10^{-3} |
| 电网 | θ_i / rad | 3.02×10^{-3} | 3.28×10^{-2} |

表 5 传统 WLS法与 BRSE 法得到的状态变量最大偏差 Table 5 Maximum deviation obtained by traditional WLS method and BRSE method

| WES method and DRSE method | | | | |
|----------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| 团伙 | 骨本业量 | 状态变量: | 最大偏差 | |
| M H | 扒心文里 | 传统WLS法 | BRSE 法 | |
| | p_i | 2.89×10^{-5} | 4.09×10^{-4} | |
| 热网 | T_{si} / °C | 1.35×10^{-5} | 1.42×10^{-5} | |
| | $T_{n} \nearrow ^{\circ} C$ | 5.93×10^{-6} | 6.28×10^{-6} | |
| के छा | u _i | 8.83×10^{-7} | 6.38×10^{-6} | |
| 电网 | $\theta_i / \operatorname{rad}$ | 3.02×10^{-6} | 3.28×10^{-5} | |

4.1.3 计算效率测试

传统 WLS法与 BRSE 法通过1000 次蒙特卡洛 实验的总计算耗时及单次实验所需的迭代次数对比 如表6所示。由表6可见,本文提出的 BRSE 法的总 消耗时间少于传统的 WLS法,并且在单次实验中仅 需迭代1次,显示出较高的计算效率。

表 6 传统 WLS 法与 BRSE 法的总计算耗时 与单次实验迭代次数

Table 6 Total computation time and single experiment iterations of traditional WLS method and BRSE method

| 方法 | 1000次实验总耗时/s | 单次实验迭代次数 |
|--------|--------------|----------|
| 传统 WLS | 28.18 | 4 |
| BRSE | 17.22 | 1 |

4.2 抗差性测试

4.2.1 强相关不良数据情况下的抗差性对比

为测试本文提出BRSE法的抗差性能,在所搭 建的IEHS测试系统设置了3种存在强相关性不良 数据的情形。

(1)情形1:仅电网中有不良数据。设置电网量 测量中不良数据的占比为4.98%。

(2)情形2:仅热网中有不良数据。设置热网中 不良数据的占比为6%。

(3)情形3:电网和热网中均出现含强相关性的 不良数据。设置电网量测中不良数据的占比为3%, 热网量测中的占比为6%。

3种情形中不良数据出现的位置和类型见附录D。

对以上3种情形分别采用WLS+LNR法与本文 提出的BRSE法进行计算,得到系统状态变量的最 大偏差分别如表7—9所示。表中,*u_i*,*p_i*相关数据均 为标幺值。

由3种不良数据情况计算结果可知,当IEHS中 出现一定比例的强相关性不良数据时,本文提出的 BRSE法表现出良好的抗差性,而WLS+LNR法对于 强相关性不良数据辨识的能力较差,尤其当热网中

表7 情形1下WLS+LNR法与BRSE法 得到的状态变量最大偏差

Table 7 Maximum deviation obtained by WLS+LNR method and BRSE method in Case 1

| 111/14 | 业太亦具 | 状态变量最大偏差 | | | |
|--------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|--|--|
| 网络 | 扒芯文里 | WLS+LNR 法 | BRSE 法 | | |
| | P_i | 2.60×10^{-4} | 4.02×10^{-4} | | |
| 热网 | $T_{si} \nearrow ^{\circ} \mathrm{C}$ | 1.30×10^{-4} | 1.57×10^{-5} | | |
| | $T_{ri} \nearrow ^{\circ} \mathbb{C}$ | 5.98×10^{-4} | 1.56×10^{-5} | | |
| 바 쩐 | u_i | 4.36×10^{-5} | 1.23×10^{-5} | | |
| 电网 | θ_i / rad | 9.55×10^{-4} | 1.59×10^{-4} | | |

表 8 情形 2 下 WLS+LNR 法与 BRSE 法 得到的状态变量最大偏差

Table 8 Maximum deviation obtained by WLS+LNR method and BRSE method in Case 2

| 11/14/2 | 业太亦具 | 状态变量 | 最大偏差 |
|---------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 网络 | 扒芯文里 | WLS+LNR法 | BRSE 法 |
| | P_i | 5.73×10^{-2} | 4.81×10^{-4} |
| 热网 | $T_{si} \nearrow ^{\circ} \mathbb{C}$ | 1.81×10^{-1} | 2.00×10^{-3} |
| | $T_{ri} \nearrow ^{\circ} C$ | 4.01×10^{-2} | 1.01×10^{-4} |
| क ज | u_i | 9.19×10 ⁻⁶ | 5.99×10^{-6} |
| 电网 | $\theta_i / \operatorname{rad}$ | 2.99×10^{-5} | 3.31×10^{-5} |

表9 情形3下WLS+LNR法与BRSE法 得到的状态变量最大偏差

Table 9 Maximum deviation obtained by WLS+LNR method and BRSE method in Case 3

| 1114 | 坐太亦昌 | 状态变量 | 最大偏差 |
|------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 网络 | 扒芯文里 | WLS+LNR法 | BRSE 法 |
| | p_i | 5.72×10 ⁻² | 4.99×10 ⁻⁴ |
| 热网 | $T_{si} \nearrow ^{\circ} \mathrm{C}$ | 1.80×10 ⁻¹ | 2.01×10 ⁻³ |
| | $T_{n} \nearrow C$ | 4.02×10 ⁻² | 1.02×10^{-4} |
| 中國 | u _i | 2.43×10 ⁻⁵ | 8.69×10 ⁻⁵ |
| 电网 | θ_i / rad | 8.90×10 ⁻⁵ | 7.78×10 ⁻⁵ |

出现强相关性不良数据时,WLS+LNR法的计算结果 会出现明显偏差。

将情形3下WLS+LNR法与BRSE法对于IEHS 测试系统的状态变量估计误差进行比较,结果如图 1、2所示。

由图1、2可知,WLS+LNR法对节点31—39处的 状态变量产生了较大的估计误差,而BRSE法则可 保证电网中全部节点具有较好的估计精度。 4.2.2 不良数据占比变化下的抗差性检验

进一步利用状态估计合格率来检验BRSE法的 抗差性。从所搭建的测试系统的量测量中随机选取 并设置为不良数据,不良数据的比例为0~10%。其

中,不良数据的设置情况包括置0、取反、扩大2倍以 及变为原来的1/2。在不同的不良数据比例下均 进行1000次蒙特卡洛实验,BRSE法与WLS+LNR法 得到的合格率如图3所示。

由计算结果可知,随着IEHS量测系统中不良数据比例的增加,BRSE法与WLS+LNR法计算得到的状态估计合格率均有所降低,但BRSE法具有良好





different bad data ratios

的抗差性。

当不良数据占比为10%时,2种算法对IEHS测试系统计算得到的热网状态变量估计值如图4-6 所示。

由图4—6可见,WLS+LNR法出现了较大的局部估计误差(如热网中节点8的供热温度估计值与节点3、13的回热温度估计值),而BRSE法的估计结果则更为准确。

此外,从计算效率来看,由于WLS+LNR法每次 只能辨识1个不良数据(残差最大对应的不良数





据),且每次状态估计计算均需非线性迭代,因此随着量测系统中不良数据比例的增加,WLS+LNR法所需的计算时间会更长。以该IEHS量测系统中不良数据占比5%为例,在进行1000次蒙特卡洛实验时,WLS+LNR法所需时间长达511.20s,而本文提出的BRSE法仅需20.12s,其高效性得到了验证。

5 结论

本文提出了一种面向IEHS的BRSE方法。与传统WLS法相比,所提方法具有以下优势:

(1)对IEHS中强相关的多不良数据具有良好的

抗差能力;

(2)对于量测系统中存在的强相关性不需要非 线性迭代,计算效率较高。

此外,本文仅讨论了热电系统通过CHP简单耦 合的情况的状态估计模型,下一步的工作是研究当 IEHS通过多种不同类型耦合元件以及多种情况下 耦合时,该方法的适用性及改进方法。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 多能协同综合能源系统示范工程现状 与展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):3-10.
 PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (6):3-10.
- [2] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等.区域综合能源系统电/气/热混 合潮流算法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.

XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.

- [3] 程林,张靖,黄仁乐,等.基于多能互补的综合能源系统多场景规划案例分析[J].电力自动化设备,2017,37(6):282-287.
 CHENG Lin,ZHANG Jing,HUANG Renle, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(6):282-287.
- [4] 王英瑞,曾博,郭经,等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术,2016,40(10):2942-2951.
 WANG Yingrui,ZENG Bo,GUO Jing, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2951.
- [5] 白牧可,王越,唐巍,等.基于区间线性规划的区域综合能源系统日前优化调度[J].电网技术,2017,41(12):3963-3970.
 BAI Muke, WANG Yue, TANG Wei, et al. Day-ahead optimal dispatching of regional integrated energy system based on interval linear programming[J]. Power System Technology,2017,41(12): 3963-3970.
- [6]刘述欣,戴赛,胡林献,等.电热联合系统最优潮流研究[J].电 网技术,2018,42(1):285-290.
 LIU Shuxin, DAI Sai, HU Linxian, et al. Study on optimal power flow of combined electro-thermal system[J]. Power System Technology,2018,42(1):285-290.
- [7] 解大,陈爱康,顾承红,等.并网式热电联供系统的时域建模与 动态仿真[J].中国电机工程学报,2018,38(13):3735-3747, 4015.

XIE Da, CHEN Aikang, GU Chenghong, et al. Time-domain modeling and dynamic simulation of the grid-connected CHPs [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3735-3747, 4015.

[8] 吴雄,王秀丽,别朝红,等.含热电联供系统的微网经济运行
 [J].电力自动化设备,2013,33(8):1-6.
 WU Xiong,WANG Xiuli,BIE Zhaohong, et al. Economic opera-

tion of microgrid with combined heat and power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8):1-6.

[9] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 能源互联网背景下的典型区域综合 能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36 (12):3292-3306.

WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306.

- [10] 顾伟,陆帅,王珺,等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报,2017,37(5):1305-1316.
 GU Wei,LU Shuai,WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE,2017, 37(5):1305-1316.
- [11] LIU X, JENKINS N, WU J, et al. Combined analysis of electricity and heat networks [D]. Cardiff, UK: Cardiff University, 2014.
- [12] 王文学,胡伟,孙国强,等. 电-热互联综合能源系统区间潮流 计算方法[J]. 电网技术,2019,43(1):83-95.
 WANG Wenxue,HU Wei,SUN Guoqiang, et al. Interval energy flow calculation method of integrated electro-thermal system[J]. Power System Technology,2019,43(1):83-95.

[13] FANG T, LAHDELMA R. State estimation of district heating

network based on customer measurements [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1) : 1211-1221.

- [14] 董今妮,孙宏斌,郭庆来,等. 热电联合网络状态估计[J]. 电网技术,2016,40(6):1635-1641.
 DONG Jinni,SUN Hongbin,GUO Qinglai, et al. State estimation for combined electricity and heat networks [J]. Power System Technology,2016,40(6):1635-1641.
- [15] 陈艳波,马进. 一种双线性抗差状态估计方法[J]. 电力系统 自动化,2015,39(6):41-47.
 CHEN Yanbo,MA Jin. A bilinear robust state estimation method for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(6):41-47.

作者简介:



陈艳波(1982—),男,河南西峡人,副教 授,博士,主要研究方向为综合能源系统(Email:yanbochen2008@sina.com);

姚 远(1996—), 男, 山西长治人, 硕士 研究生, 主要研究方向为综合能源系统状态 估计(**E-mail**: 706670367@qq.com);

陈艳波

主要研究方向为综合能源系统状态估计

杨晓楠(1986-),女,北京人,工程师,

(**E-mail**:yangxiaonan@epri.sgcc.com.cn)_o

Bilinear robust state estimation method for integrated electricity-heat energy systems

CHEN Yanbo^{1,2}, YAO Yuan¹, YANG Xiaonan², LANG Yansheng²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power

Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: A bilinear robust state estimation method for the IEHS(Integrated Electricity-Heat System) is proposed. Firstly, a linear WLAV(Weighted Least Absolute Value) model for IEHS is constructed by introducing auxiliary variables, and then the estimated value of the state variables is obtained by a nonlinear transformation and a quadratic programming model solving. The proposed method has better recognition ability for strongly correlated multiple bad data, and it doesn't need to perform nonlinear iteration, so it has high computational efficiency. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified on the established test system for IEHS.

Key words: CHP; linearization of measurement equation; state estimation; strong correlation bad data; integrated energy system



图 A1 热力模型中与节点相关的温度 Fig. A1 Temperatures associated with each node



图 A2 热力模型中管道入口与出口的温度表示

Fig.A2 Temperature representation of inlet and outlet of pipeline in thermal model



图 A3 热力模型中混合节点出口的温度计算表示 Fig.A3 Representation of outlet temperature of hybrid node in thermal model

附录 B: 算例系统拓扑结构图与具体参数



图 B1 IEHS 拓扑结构图 Fig.B1 IEHS topology diagram

表 B1 热网基本参数 TableB1 Basic parameters of heating network

| 参数 | 参数值 |
|--|------------------------|
| 比热容 C _p /[MJ/(kg・K) ⁻¹] | 4.182×10 ⁻³ |
| 传热系数 λ/[W/(m・K)] | 2.00×10 ⁻⁷ |
| 水的运动粘度 μ/(m ² ・s ⁻¹) | 2.00×10 ⁻⁹ |
| 重力加速度 g/[(kg•m)/s ⁻²] | 9.8 |
| 水密度p / (kg•m ⁻³) | 1.00×10^{3} |

表 B2 热网支路节点信息 Table B2 Branch node information of heating network

| 支路起点 | 支路终点 | 支路编号 | 支路长度/m | 支路起点 | 支路终点 | 支路编号 | 支路长度/m |
|------|------|------|--------|------|------|------|--------|
| 1 | 2 | 1 | 400 | 11 | 12 | 11 | 402 |
| 2 | 3 | 2 | 420 | 12 | 13 | 12 | 374 |
| 3 | 4 | 3 | 450 | 13 | 14 | 13 | 438 |
| 4 | 5 | 4 | 390 | 14 | 15 | 14 | 444 |
| 5 | 6 | 5 | 400 | 15 | 16 | 15 | 401 |
| 6 | 7 | 6 | 415 | 16 | 17 | 16 | 401 |
| 7 | 8 | 7 | 425 | 17 | 18 | 17 | 420 |
| 8 | 9 | 8 | 380 | 18 | 19 | 18 | 420 |
| 9 | 10 | 9 | 295 | 19 | 20 | 19 | 406 |
| 10 | 11 | 10 | 413 | 1 | 3 | 20 | 615 |

注: 各管道直径 D 均为 0.15m。

附录 C: 正常情况下 IEHS 状态估计值结果

| 表 C1 电网状态估计值 TableC1 State estimation values of electric network | | | | | | |
|---|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| | 状态变 | 医量真值 | 传统 WLS | S 估计结果 | BRSE (| 古计结果 |
| 节点 <i>i</i> | V_i | θ_i /rad | V_i | θ_i /rad | V_i | θ_i /rad |
| 1 | 1.0475 | -0.1658 | 1.0476 | -0.1658 | 1.0478 | -0.1662 |
| 2 | 1.0490 | -0.1211 | 1.0490 | -0.1211 | 1.0492 | -0.1216 |
| 3 | 1.0304 | -0.1707 | 1.0305 | -0.1708 | 1.0306 | -0.1712 |
| 4 | 1.0038 | -0.1846 | 1.0039 | -0.1846 | 1.0040 | -0.1848 |
| 5 | 1.0050 | -0.1640 | 1.0051 | -0.1640 | 1.0052 | -0.1641 |
| 6 | 1.0073 | -0.1518 | 1.0074 | -0.1518 | 1.0076 | -0.1519 |
| 7 | 0.9967 | -0.1903 | 0.9967 | -0.1902 | 0.9968 | -0.1902 |
| 8 | 0.9957 | -0.1991 | 0.9957 | -0.1990 | 0.9958 | -0.1992 |
| 9 | 1.0281 | -0.1960 | 1.0281 | -0.1959 | 1.0282 | -0.1975 |
| 10 | 1.0170 | -0.1099 | 1.0170 | -0.1098 | 1.0171 | -0.1099 |
| 11 | 1.0125 | -0.1241 | 1.0125 | -0.1240 | 1.0126 | -0.1241 |
| 12 | 1.0000 | -0.1233 | 1.0000 | -0.1232 | 1.0002 | -0.1227 |
| 13 | 1.0142 | -0.1223 | 1.0142 | -0.1222 | 1.0143 | -0.1222 |
| 14 | 1.0117 | -0.1515 | 1.0117 | -0.1515 | 1.0118 | -0.1517 |
| 15 | 1.0158 | -0.1589 | 1.0158 | -0.1588 | 1.0159 | -0.1595 |
| 16 | 1.0322 | -0.1344 | 1.0322 | -0.1344 | 1.0324 | -0.1349 |
| 17 | 1.0339 | -0.1518 | 1.0339 | -0.1518 | 1.0341 | -0.1521 |
| 18 | 1.0313 | -0.1665 | 1.0313 | -0.1664 | 1.0314 | -0.1670 |
| 19 | 1.0500 | -0.0537 | 1.0500 | -0.0537 | 1.0501 | -0.0542 |
| 20 | 0.9910 | -0.0783 | 0.9910 | -0.0783 | 0.9911 | -0.0788 |
| 21 | 1.0321 | -0.0924 | 1.0321 | -0.0924 | 1.0322 | -0.0928 |
| 22 | 1.0500 | -0.0148 | 1.0500 | -0.0148 | 1.0501 | -0.0149 |
| 23 | 1.0450 | -0.0183 | 1.0450 | -0.0183 | 1.0451 | -0.0192 |
| 24 | 1.0377 | -0.1323 | 1.0377 | -0.1323 | 1.0379 | -0.1331 |
| 25 | 1.0575 | -0.0973 | 1.0575 | -0.0972 | 1.0576 | -0.0979 |
| 26 | 1.0522 | -0.1192 | 1.0522 | -0.1191 | 1.0523 | -0.1198 |
| 27 | 1.0379 | -0.1543 | 1.0379 | -0.1543 | 1.0381 | -0.1547 |
| 28 | 1.0502 | -0.0579 | 1.0502 | -0.0577 | 1.0503 | -0.0584 |
| 29 | 1.0500 | -0.0098 | 1.0500 | -0.0097 | 1.0501 | -0.0102 |
| 30 | 1.0475 | -0.0788 | 1.0475 | -0.0788 | 1.0476 | -0.0795 |
| 31 | 0.9820 | 0.0000 | 0.9831 | 0.0299 | 0.9821 | 0.0000 |
| 32 | 0.9831 | 0.0297 | 0.9972 | 0.0374 | 0.9831 | 0.0296 |
| 33 | 0.9972 | 0.0373 | 1.0123 | 0.0123 | 0.9973 | 0.0370 |
| 34 | 1.0123 | 0.0122 | 1.0493 | 0.0717 | 1.0124 | 0.0118 |
| 35 | 1.0493 | 0.0718 | 1.0635 | 0.1188 | 1.0494 | 0.0717 |
| 36 | 1.0635 | 0.1188 | 1.0278 | 0.0211 | 1.0636 | 0.1178 |
| 37 | 1.0278 | 0.0211 | 1.0265 | 0.1135 | 1.0279 | 0.0205 |
| 38 | 1.0265 | 0.1135 | 1.0300 | -0.1926 | 1.0266 | 0.1130 |
| 39 | 1.0300 | -0.1926 | 0.9967 | -0.1902 | 1.0301 | -0.1935 |

| Table C2 State estimation values of heating network | | | | | | | | | |
|---|----------|-----------------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------------------------|-------------------------------|
| | 状态变量真值 | | | 传统 WLS 估计结果 | | | BRSE 估计结果 | | |
| 节点 <i>i</i> | P_i | $T_{\rm si}/{ m ^{\circ}C}$ | $T_{\rm ri}/{ m ^{\circ}C}$ | P_i | $T_{\rm s\it i}/{ m ^{\circ}C}$ | $T_{\rm ri}/{}^\circ\!{ m C}$ | P_i | $T_{\rm si}/{ m ^{\circ}C}$ | $T_{\rm ri}/{}^\circ\!{ m C}$ |
| 1 | -3.2136 | 99.8679 | 49.4911 | -0.0322 | 99.8682 | 49.4911 | -0.0321 | 99.8668 | 49.4907 |
| 2 | -5.8863 | 99.7682 | 49.4965 | -0.0589 | 99.76858 | 49.4964 | -0.0589 | 99.7687 | 49.4970 |
| 3 | -18.5408 | 99.6889 | 49.5017 | -0.1855 | 99.6893 | 49.5017 | -0.1854 | 99.6880 | 49.5013 |
| 4 | -28.2563 | 99.6160 | 49.5026 | -0.2827 | 99.6164 | 49.5026 | -0.2826 | 99.6169 | 49.5033 |
| 5 | -37.0148 | 99.5363 | 49.5046 | -0.3703 | 99.5366 | 49.5046 | -0.3702 | 99.5366 | 49.5044 |
| 6 | -44.9310 | 99.4477 | 49.5082 | -0.4494 | 99.4481 | 49.5082 | -0.4493 | 99.4483 | 49.5076 |
| 7 | -51.9218 | 99.3501 | 49.5134 | -0.5192 | 99.7742 | 49.5052 | -0.5200 | 99.2169 | 49.5464 |
| 8 | -57.2483 | 99.2557 | 49.5146 | -0.5725 | 99.8140 | 49.6050 | -0.5733 | 99.1895 | 49.5050 |
| 9 | -60.7232 | 99.1758 | 49.5058 | -0.6072 | 99.7191 | 49.4419 | -0.6080 | 99.0811 | 49.5143 |
| 10 | -64.7443 | 99.0529 | 49.5107 | -0.6474 | 99.4698 | 49.5198 | -0.6483 | 99.2622 | 49.4647 |
| 11 | -67.9151 | 98.9201 | 49.5152 | -0.6790 | 99.3659 | 49.4955 | -0.6800 | 98.8654 | 49.4698 |
| 12 | -70.2464 | 98.7813 | 49.5162 | -0.7023 | 99.4445 | 49.4755 | -0.7033 | 98.8478 | 49.5203 |
| 13 | -72.3372 | 98.5959 | 49.5295 | -0.7232 | 99.4128 | 49.4806 | -0.7241 | 98.5788 | 49.5581 |
| 14 | -73.8948 | 98.3770 | 49.5486 | -0.7387 | 99.2712 | 49.5343 | -0.7397 | 98.4555 | 49.6509 |
| 15 | -74.8698 | 98.1409 | 49.5639 | -0.7485 | 99.0385 | 49.5973 | -0.7494 | 98.0735 | 49.5375 |
| 16 | -75.4956 | 97.8458 | 49.5872 | -0.7547 | 98.9151 | 49.4794 | -0.7557 | 97.7227 | 49.5946 |
| 17 | -75.8647 | 97.4352 | 49.6345 | -0.7584 | 98.9976 | 49.5366 | -0.7594 | 97.3108 | 49.6313 |
| 18 | -76.0291 | 96.8223 | 49.7298 | -0.7601 | 98.7688 | 49.4941 | -0.7610 | 96.8647 | 49.6530 |
| 19 | -76.0690 | 95.6479 | 50 | -0.7605 | 98.5621 | 49.6076 | -0.7614 | 95.6327 | 49.9824 |
| 20 | 0 | 100.0000 | 49.4236 | 0.0100 | 98.4938 | 49.5702 | 0.0300 | 99.9824 | 49.3529 |

表 C2 热网状态估计值

附录 D: 3 种强相关性不良数据情形设置

| Table D1 | Dau uata s | cuing of | | | |
|--------------|-----------------------|-----------|------------------------|--|--|
| 不良数据位置 | 不良数据美 | 类型 不 | 良数据设置 | | |
| | V_{23} | | V ₂₃ /2 | | |
| 节点 23 | P_{23} | | $P_{23}/2$ | | |
| | Q_{23} | | $2 \times Q_{23}$ | | |
| | V_{24} | | $-V_{24}/2$ | | |
| 节点 24 | P_{24} | | P ₂₄ /3 | | |
| | Q_{24} | | $Q_{24}/2$ | | |
| | V_{25} | | 0 | | |
| 节点 25 | P_{25} | | $P_{25}/2$ | | |
| | Q_{25} | | Q ₂₅ /2 | | |
| | P ₂₂₋₂₃ | | P ₂₂₋₂₃ /2 | | |
| 文路 22-23 | Q22-23 | | Q ₂₂₋₂₃ /2 | | |
| 士啦 22.24 | P ₂₃₋₂₄ | | -P ₂₃₋₂₄ /2 | | |
| 又略 23-24 | Q23-24 | | 0 | | |
| 士啦 25 26 | P ₂₅₋₂₆ | | -P ₂₅₋₂₆ /2 | | |
| 义昭 23-20 | Q_{25-26} | | 0 | | |
| 表 D2 | 青形 2 的不 Pod doto a | 良数据 | 设置 「Case 2 | | |
| Table D2 | Bad data s | etting of | Case 2 | | |
| 不良数据位置 | 不良数据美 | 类型 不 | 良数据设置 | | |
| | T_{s2} | | $2 \times T_{s2}$ | | |
| 士占 2 | T_{r2} | | $2 \times T_{r_2}$ | | |
| [· 제 4 | m_{q2} | | 0 | | |
| | P_2 | | 0 | | |
| 士占 2 | T_{s3} | | $2 \times T_{s3}$ | | |
| 6 됬 대 | P_3 | | $2 \times P_3$ | | |
| 表 D 3 | 青形3的不 | 良数据 | 设置 | | |
| Table D3 | Bad data s | etting of | f Case 3 | | |
| 据类型 不良数 | 女据设置 系 | 、统类型 | 不良数据信 | | |
| | | | | | |
| 3 V | 23/2 | | | | |

表 D1 情形 1 的不良数据设置 Table D1 Bad data setting of Case 1

| 系统类型 | 不良数据位置 | 不良数据类型 | 不良数据设置 | 系统类型 | 不良数据位置 | 不良数据类型 | 不良数据设置 |
|------|-----------|--------------------|------------------------|-------|--------|--------------|-------------------|
| 电网 | | V ₂₃ | V ₂₃ /2 | | | T_{s2} | $2 \times T_{s2}$ |
| | 节点 23 | P ₂₃ | $P_{23}/2$ | | 节点 2 | T_{r2} | $2 \times T_{r2}$ |
| | # = = = = | P_{24} | P ₂₄ /3 | ++ 11 | | $m_{ m q2}$ | 0 |
| | 节点 24 | Q_{24} | Q_{24} | 热网 | | P_2 | 0 |
| | 节点 25 | V_{25} | 0 | | 节点3 | $T_{\rm s3}$ | $2 \times T_{s3}$ |
| | | Q_{25} | $Q_{25}/2$ | | | P_3 | $2 \times P_3$ |
| | 支路 22-23 | P ₂₂₋₂₃ | P ₂₂₋₂₃ /2 | | | | |
| | | Q ₂₂₋₂₃ | Q ₂₂₋₂₃ /2 | | | | |
| | 支路 23-24 | P ₂₃₋₂₄ | -P ₂₃₋₂₄ /2 | | | | |
| | | Q_{23-24} | 0 | | | | |